

2.3. ZWIĄZEK WODOWSKAZÓW

Ciągi pomiarowe – ze względu na przerwy w obserwacjach lub zbyt krótki okres obserwacji – są często niekompletne i wymagają uzupełnienia. W takich przypadkach należy znaleźć taki profil rzeczny, w którym rytm stanów wody jest podobny do rytmu charakterystycznego dla badanego profilu, w którym występują braki.

Uzupełnianie ciągów pomiarowych stanów wody dokonywane jest na podstawie zależności regresyjnych pomiędzy dwoma (ryc. 2.3.1A) lub trzema wodowskazami (ryc. 2.3.1B), z których w jednym występują braki w obserwacjach. Zależności te nazywają się **związkiem wodowskazów**. Oprócz uzupełnienia ciągów są one również wykorzystywane do następujących celów:

- rekonstrukcji ciągów historycznych,
- wydłużania ciągów pomiarowych,
- uzupełniania brakujących stanów wody lub przepływów,
- przewidywania stanów wody lub przepływów w związku z ochroną przeciwpowodziową lub na potrzeby żeglugi,
- kontroli spostrzeżeń wodowskazowych,
- kontroli zmian morfologicznych zachodzących w korycie rzeki.

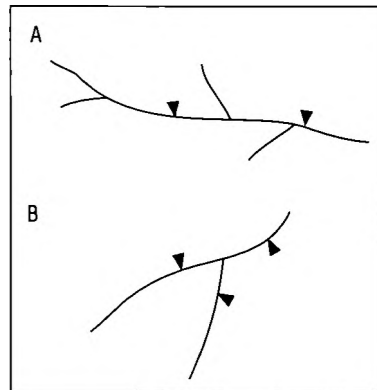
W funkcjach opisujących związek wodowskazów, zmienną opisywaną są stany wody na wodowskazie uzupełnianym, natomiast zmienną lub zmiennymi opisującymi – stany na wodowskazie lub wodowskazach uzupełniających. Ustalenie takiej zależności wymaga znajomości tzw. **stanów korespondujących**. Stany wody korespondujące wyznacza się na podstawie analizy **hydrogramów**. Jako stany korespondujące, przyjmuje się najczęściej kulminacje wezbrań lub najniższe stany podczas niżówek. Zaleca się, aby stany korespondujące wybierano z okresów bezpośrednio przed i po przerwie w obserwacjach, bowiem związek wodowskazów może ulegać zakłóceniu na skutek zmiany kształtu przekrojów poprzecznych koryt rzecznych w badanych profilach. Na odcinku rzeki pomiędzy parą wodowskazów nie powinny występować zmiany spowodowane ingerencją człowieka, np. w postaci zrzutów lub poborów wody.

Jeśli między wodowskazami istnieje związek, ma on najczęściej postać funkcji liniowej. W przypadku związku dwóch wodowskazów przyjmuje zwykle postać:

$$X_B = a X_A + b \quad (2.3.1)$$

gdzie:

- X_B – stany wody (lub przepływy) w profilu B,
 X_A – stany wody (lub przepływy) w profilu A,



Ryc. 2.3.1. Schemat sieci rzecznej przy związku dwóch (A) i trzech (B) wodowskazów



Wodowskaz w Potoku Chocholowskim (Tatry)



Wodowskaz zlokalizowany na betonowej obudowie koryta rzeczego

a , b – współczynniki określane metodą najmniejszych kwadratów:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n X_{Ai} X_{Bi} - n X_{A\bar{s}r} X_{B\bar{s}r}}{\sum_{i=1}^n X_{Ai}^2 - n X_{A\bar{s}r}^2} \quad (2.3.2)$$

$$b = X_{B\bar{s}r} - a X_{A\bar{s}r} \quad (2.3.3)$$

gdzie:

$X_{A\bar{s}r}$ – średni stan wody (lub przepływ) w profilu A,

$X_{B\bar{s}r}$ – średni stan wody (lub przepływ) w profilu B,

n – liczebność ciągów.

Stany wody obliczone na podstawie równania regresji różnią się od danych empirycznych wskutek wpływu czynników nieuwzględnionych w badaniu. Wielkość tego odchylenia, zwanego **średnim błędem szacunku** lub standardowym błędem oceny, można obliczyć według następującego wzoru:

$$B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Bi} - X'_{Bi})^2}{n-2}} \quad (2.3.4)$$

gdzie:

B – średni błąd szacunku,

X_B – stany wody (lub przepływy) rzeczywiste w profilu B,

X'_{Bi} – stany wody (lub przepływy) obliczone w profilu B,

n – liczebność ciągu.

O sile związku wodowskazów świadczy wartość **współczynnika korelacji liniowej** r , który oblicza się według wzoru:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_{Ai} X_{Bi} - n X_{A\bar{s}r} X_{B\bar{s}r}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{Ai}^2 - n X_{A\bar{s}r}^2)} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{Bi}^2 - n X_{B\bar{s}r}^2)}} \quad (2.3.5)$$

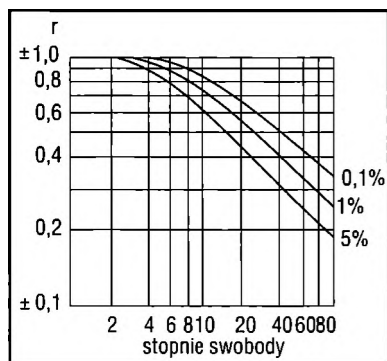
gdzie:

r – współczynnik korelacji,

X_A – stany wody (lub przepływy) w profilu A,

X_B – stany wody (lub przepływy) w profilu B,

$X_{A\bar{s}r}$ – średni stan wody (lub przepływ) w profilu A,



Ryc. 2.3.2. Poziomy istotności współczynników korelacji (na podstawie rozkładu t-Studenta)

X_{Bsr} – średni stan wody (lub przepływ) w profilu B,
 n – liczebność ciągu.

Współczynnik ten przyjmuje wartości od -1 do +1. Jeśli $r > 0$, związek między X_A i X_B jest wprost proporcjonalny, gdy $r < 0$, związek jest odwrotnie proporcjonalny. W zależności od wartości współczynnika r , **siła związku** pomiędzy zmiennymi jest różna (tab. 2.3.1).

Po obliczeniu współczynnika korelacji, należy zbadać jego istotność statystyczną. Można tego dokonać na podstawie testu t -Studenta („Student” – pseudonim francuskiego matematyka W.S. Gosseta), obliczając charakterystykę t dla $n - 2$ stopni swobody:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2.3.6)$$

gdzie:

r – współczynnik korelacji,
 n – liczba badanych par ($n < 122$).

Obliczoną wartość t należy porównać z wartościami krytycznymi rozkładu t -Studenta przedstawionymi w tab. 2.3.2. Gdy t obliczone jest większe od wartości krytycznej, można przyjąć, że otrzymana wartość współczynnika korelacji jest istotna na danym poziomie istotności. Zwykle, w naukach przyrodniczych wymagana jest istotność współczynnika korelacji na poziomie 5%, co oznacza, że dopuszcza się pięcioprocentowe prawdopodobieństwo przypadkowego otrzymania obliczonego współczynnika korelacji (ryc. 2.3.2).

Należy zwrócić uwagę, iż wielkość współczynnika korelacji świadczy jedynie o sile związku pomiędzy badanymi zmiennymi, ale nie zawsze odzwierciedla zależność przyczynowo-skutkową. Tak jest w przypadku korelacji stanów wody pomiędzy profilami położonymi na dwóch różnych rzekach (ryc. 2.3.3). Siła związku może być bardzo duża, ale nie świadczy to o wpływie stanów wody w profilu A na stany wody w profilu B. Podobnie jest w przypadku korelacji pomiędzy dwoma profilami w obrębie jednej rzeki, jeśli uzupełniany ciąg dotyczy profilu położonego powyżej profilu posiadającego pełny cykl obserwacji. Gdy jednak związek odnosi się do dwóch profili w obrębie jednej rzeki, lecz profilem o niepełnym ciągu pomiarowym jest profil B – położony poniżej profilu A, wówczas wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy nie tylko o silnym związku statystycznym pomiędzy stanami w obu profilach, ale oznacza również, że stany wody w profilu A wpływają na stany wody w profilu B i jest to zależność przyczynowo-skutkowa (ryc. 2.3.4).

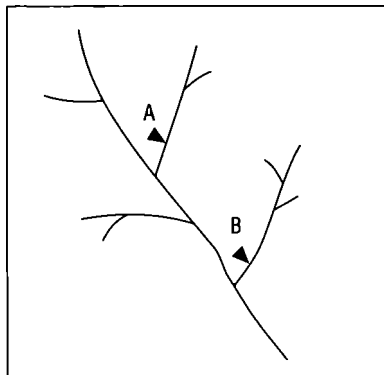
O tym, w jakim stopniu zmiany stanów wody w profilu B wpływają na zmiany stanów wody w profilu A, wskazuje **współczyn-**

Tab. 2.3.1. Współczynnik korelacji i odpowiadająca mu siła związku (Stanisz, 1998)

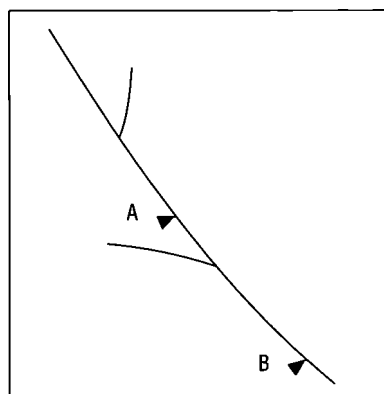
Współczynnik korelacji r	Siła korelacji
<0,1	nikła
0,1–0,3	słaba
0,3–0,5	przeciętna
0,5–0,7	wysoka
0,7–0,9	bardzo wysoka
0,9–1,0	prawie pełna

Tab. 2.3.2. Wartości krytyczne rozkładu t -Studenta (Kaczmarek, 1970)

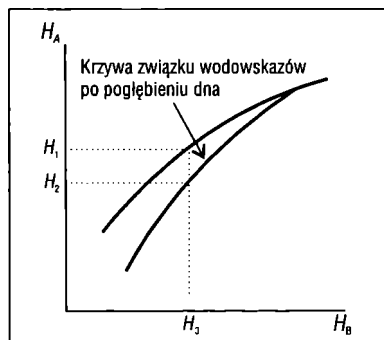
n	α	
	0,05	0,01
10	2,23	3,17
11	2,20	3,11
12	2,18	3,06
13	2,18	3,06
14	2,14	2,98
15	2,13	2,95
16	2,12	2,92
17	2,11	2,90
18	2,10	2,88
19	2,09	2,86
20	2,09	2,85
21	2,08	2,83
22	2,07	2,82
23	2,07	2,81
24	2,06	2,80
25	2,06	2,79
26	2,06	2,78
27	2,05	2,77
28	2,05	2,76
29	2,05	2,76
30	2,04	2,75
40	2,02	2,70
60	2,00	2,66
120	1,98	2,62



Ryc. 2.3.3. Układ wodowskazów: stany wody w profilu A nie wpływają na stany wody w profilu B



Ryc. 2.3.4. Układ wodowskazów: stany wody w profilu A wpływają na wielkość stanów wody w profilu B

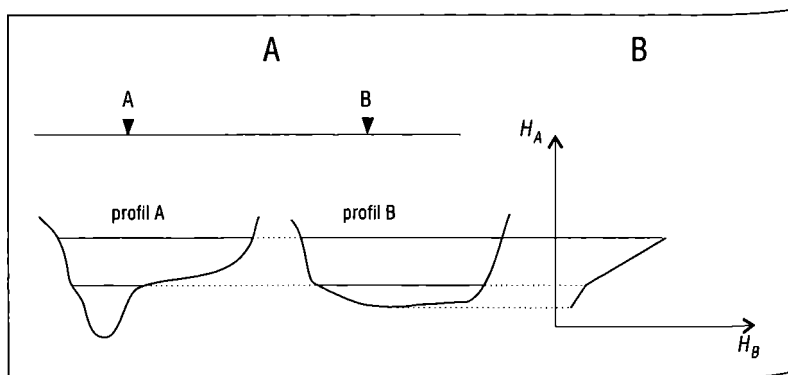


Ryc. 2.3.5. Zmiany związku dwóch wodowskazów spowodowane pogłębieniem dna (Byczkowski, 1996; zmienione)

nik determinacji r^2 . Na przykład, jeśli $r = 0,90$, to współczynnik determinacji $r^2 = 0,81$. Oznacza to, że stany wody w profilu B objaśniają w 81% zmienność stanów wody w profilu A. Reszta zmienności kształtowana jest przez inne czynniki.

Związki wodowskazowe ulegają zmianom głównie ze względu na zmiany morfologii koryt, spowodowane zazwyczaj procesami erozyjnymi: gdy w jednym z przekrojów obniży się dno (erozja wgłębna), wówczas odpowiadające stany w tym przekroju będą niższe (ryc. 2.3.5), i na odwrót: przy podnoszeniu się dna, odpowiadające stany będą wyższe. Zmiany te mają zwykle charakter trwały. Zmiany nietrwałe związku wodowskazów wiążą się z podpiętrzeniem wody w korycie (zjawiska lodowe, roślinność, zastawki, jazy itp.) i trwają tak długo, jak długo utrzymuje się podpiętrzenie stanów wody poniżej profilu wodowskazowego.

W przypadku nieregularnych kształtów przekrojów poprzecznych koryt rzecznych, wykresy związku wodowskazów wykazują cechy nieciągłości. Istnieje wówczas konieczność ustalenia kilku zależności liniowych. Jeśli przekrój poprzeczny koryta posiada jeden załom, wówczas związek wodowskazów składa się z dwóch odcinków prostych. Jest to tzw. złożony związek dwóch wodowskazów (ryc. 2.3.6). Jeśli punkty załomów w przekroju poprzecz-



Ryc. 2.3.6. Złożony związek dwóch wodowskazów: A – kształty przekrojów poprzecznych koryt; B – wykres złożonego związku wodowskazów (Lambor, 1971)

nym koryta leżą w dwóch różnych strefach stanów wody, wówczas związek wodowskazów będzie trzykrotnie złożony, a wykres związku będzie się składał z trzech odcinków prostych.

Przykład

Określ związek wodowskazów w Krośnie i Rzeszowie na Wiśloku i uzupełnij przepływy Wiśloka w Krośnie w okresie od 1 do 15 czerwca 1978 r. (tab. 2.3.3).

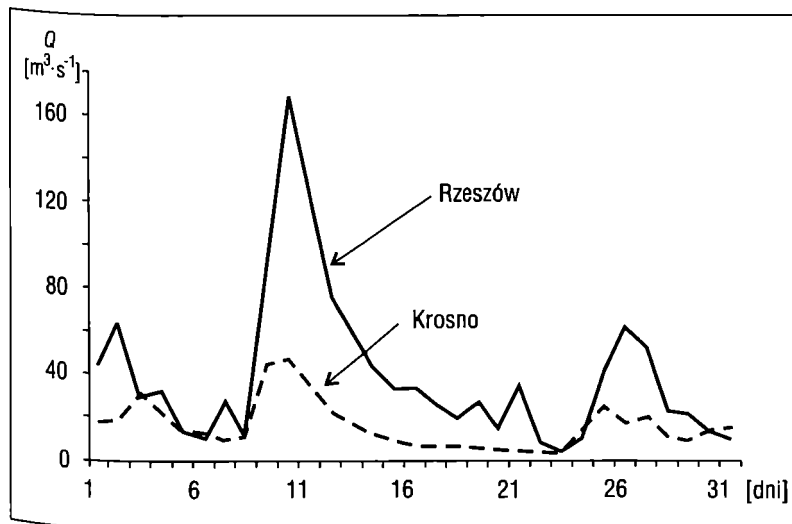
Tab. 2.3.3. Przepływy Wisłoka w Krośnie i Rzeszowie w maju 1978 r. ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Dzień	Rzeszów	Krosno	Dzień	Rzeszów	Krosno	Dzień	Rzeszów	Krosno
1	44,00	17,80	11	126,00	35,20	21	34,60	4,83
2	63,80	19,20	12	77,10	24,30	22	9,80	4,55
3	30,80	31,10	13	60,60	16,80	23	5,50	4,83
4	32,10	24,30	14	44,40	12,80	24	10,90	14,40
5	14,50	13,70	15	34,20	10,00	25	43,40	26,00
6	10,90	13,20	16	33,50	8,62	26	62,50	19,40
7	27,00	10,20	17	27,00	8,14	27	54,50	21,80
8	11,40	10,90	18	21,10	7,50	28	24,60	14,40
9	71,70	44,80	19	27,30	6,88	29	23,30	10,90
10	169,00	48,40	20	15,70	5,81	30	15,20	16,30
						31	16,20	11,70

Rozwiązanie

1. Wyznaczenie przepływów korespondujących

Na podstawie hydrogramów przepływów Wisłoka w Krośnie i Rzeszowie w maju 1978 r. (ryc. 2.3.7) należy wybrać przepływy korespondujące i zestawić je w tabeli (tab. 2.3.4, kolumny 1, 2, 3) oraz na rysunku (ryc. 2.3.8).



Ryc. 2.3.7. Przepływy Wisłoka w Krośnie i Rzeszowie w maju 1978 r.

2. Wyznaczenie zależności liniowej między wodowskazami

Jeśli X_A oznacza przepływy Wisłoka w Rzeszowie, zaś X_B przepływy w Krośnie, to związek między tymi wodowskazami, zgodnie z wzorem (2.3.1), ma postać:

$$X_B = 0,259X_A + 5,873$$

gdzie a i b zostało obliczone metodą najmniejszych kwadratów.

Tab. 2.3.4. Zestawienie korespondujących przepływów Wisłoka w Rzeszowie i Krośnie w maju 1978 r. ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), przepływów w Krośnie wyznaczonych na podstawie funkcji regresji (kolumna 4) oraz wielkości potrzebnych do określenia błędu szacunku (kolumny 5, 6)

Tab. 2.3.5. Zestawienie przepływów Wisłoka obserwowanych w Rzeszowie oraz przepływów obliczonych w Krośnie w okresie od 1 do 15 czerwca 1978 r. ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Dzień	Rzeszów	Krosno (wartości obliczone)
1	23,3	11,9
2	15,2	9,8
3	16,2	10,1
4	19,7	11,0
5	21,4	11,4
6	19,7	11,0
7	6,5	7,6
8	16,2	10,1
9	13,6	9,4
10	18,5	10,7
11	19,7	11,0
12	16,2	10,1
13	15,2	9,8
14	39,2	16,1
15	19,7	11,0

Data	Rzeszów	Krosno	Przepływ w Krośnie obliczony na podstawie funkcji regresji	$X_B - X_{B'}$	$(X_B - X_{B'})^2$
	X_A	X_B	$X_{B'}$		
1	2	3	4	5	6
1 V	44,0	17,8	17,3	0,5	0,2
2 V	63,8	19,2	22,5	-3,3	10,6
9 V	71,7	44,8	24,5	20,3	411,5
10 V	169,0	48,4	49,8	-1,4	2,0
11 V	126,0	35,2	38,6	-3,4	11,8
12 V	77,1	24,3	25,9	-1,6	2,6
13 V	60,6	16,8	21,6	-4,8	23,3
14 V	44,4	12,8	17,4	-4,6	21,3
15 V	34,2	10,0	14,8	-4,8	22,7
16 V	33,5	8,6	14,6	-6,0	35,6
17 V	27,0	8,1	12,9	-4,8	22,6
18 V	21,1	7,5	11,4	-3,9	14,9
24 V	10,9	14,4	8,7	5,7	32,4
25 V	43,4	26,0	17,2	8,8	78,2
27 V	54,5	21,8	20,0	1,8	3,1
28 V	24,6	14,4	12,3	2,1	4,5
29 V	23,3	10,9	11,9	-1,0	1,1
Suma					698,4

3. Uzupełnienie przepływów Wisłoka w Krośnie w okresie od 1 do 15 czerwca 1978 r.

Na podstawie przepływów w Rzeszowie oraz funkcji regresji liniowej $X_B = 0,259X_A + 5,873$, należy obliczyć przepływy w Krośnie (tab. 2.3.5).

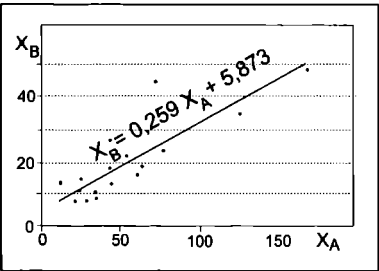
Odpowiedź

Zależność między przepływami Wisłoka w Krośnie i Rzeszowie można wyrazić w postaci funkcji liniowej $X_B = 0,259X_A + 5,873$, gdzie X_B oznacza przepływy w Krośnie, zaś X_A przepływy w Rzeszowie. Natężenie przepływów Wisłoka w Krośnie w okresie od 1 do 15 czerwca przedstawia tab. 2.3.5.

Zadanie

Jaka jest siła i istotność związku między przepływami Wisłoka w Krośnie i Rzeszowie?

W jakim stopniu zmienność przepływów Wisłoka w Rzeszowie wpływa na zmienność przepływów w Krośnie?



Ryc. 2.3.8. Przepływy korespondujące Wisłoka ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) w Krośnie (X_B) i Rzeszowie (X_A)